2019, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

DOI: 10.24850/j-tyca-2019-05-07
Artículos

Factores que inciden en el agotamiento y la contaminación por intrusión marina en el acuífero costero de La Yarada, Tacna, Perú

Factors affecting depletion and pollution by marine intrusion in the La Yarada´s coastal aquifer, Tacna, Peru

Edwin Pino[1]
Lía Ramos[2]
Oscar Avalos[3]
Príncipe Tacora[4]
Eduardo Chávarri[5]
Oscar Angulo[6]
David Ascensios[7]
Jesús Mejía[8]

[1]Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Tacna, Perú, epino68@hotmail.com, epinov@unjbg.edu.pe, https://orcid.org/0000-0003-3946-7188

[2]Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú, liarf@lamolina.edu.pe, https://orcid.org/0000-0003-3946-7188

[3]Autoridad Nacional del Agua, Lima, Perú, oavalos@ana.gob.pe

[4]Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Tacna, Perú, num_principe@hotmail.com, https://orcid.org/0000-0002-1919-8200

[5]Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú, echavarri@lamolina.edu.pe, https://orcid.org/0000-0002-8445-8996

[6]Universidad Privada de Tacna, Tacna, Perú, oangulo@upt.edu.pe, https://orcid.org/0000-0003-2282-9170

2019, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

[7]Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú, dascensios@lamolina.edu.pe, https://orcid.org/0000-0001-6161-5162

[8]Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú, jabel@lamolina.edu.pe, https://orcid.org/0000-0002-9070-3898

Autor para correspondencia: Edwin Pino, epino68@hotmail.com

Resumen

El acuífero de La Yarada, emplazado en la zona más árida de la costa peruana, se caracteriza por la escasez de recursos hídricos. Por tanto, desde hace varias décadas se utilizan aguas subterráneas para el desarrollo de la agricultura. Debido a la falta de un programa de explotación, el acuífero se ha venido sobreexplotando, generando un permanente descenso del nivel freático, comprometiendo sus reservas no renovables; esto ha causado el fenómeno de la intrusión marina debido a la alta concentración de pozos de explotación en la zona próxima a la línea del mar. En tal sentido, se pretende determinar los factores que inciden en el agotamiento y la contaminación por intrusión marina, caracterizando hidrogeológicamente el acuífero, y explicando la asociación entre geología, hidroquímica, geofísica y otras herramientas utilizadas para caracterizar acuíferos. Se determinó un área crítica de degradación de la calidad del agua subterránea de unos 131 km^2 (60 km^2 por intrusión marina), con valores muy altos de sodio, lo que indica un aumento paulatino de este ion, en respuesta a la mayor penetración de la cuña salina en las zonas más cercanas a la costa y por otros factores en otras áreas. Existe coincidencia entre la dirección del flujo subterráneo y el aumento en el contenido de cloruros, aunque localmente se aprecian algunas desviaciones. Las secciones geoeléctricas permiten identificar una capa inferior con resistividades bajas y muy bajas, lo que expresa un acuífero altamente mineralizado en el litoral, lo cual denota procesos de intrusión marina.

Palabras clave: agotamiento de acuíferos, acuífero La Yarada, hidrogeología, intrusión marina.

Abstract

2019, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

The La Yarada aquifer, located in the Tacna region, is the most arid zone of the Peruvian coast, characterized by the scarcity of water resources. For several decades this situation resulted to the use of groundwater for the development of agriculture and other economic activities. However, due to the lack of a program for operating the aquifer it is being overexploited generating a permanent lowering of water tables, compromising their non-renewable reserves, which has caused the phenomenon of seawater intrusion due to the high concentration of groundwater wells operating in the zone next to the coastline. In this common sense, it is intended to determine the factors that affecting the depletion and contamination by seawater intrusion, characterizing the aquifer's hydrogeology and explaining the correlation between geology, hydrochemistry, geophysics and other tools used to characterize aquifers. A critical area of groundwater quality degradation in the aquifer was determined, comprising an approximate 131 km^2 (60 km^2 by marine intrusion) with very high values of sodium, indicating a gradual increase of this ion in response to the greater penetration of the saline wedge in areas closer to the coast and by other factors in other areas. There is also overlap between the direction of groundwater flow and the increase in chloride content, although some deviations are locally appearing. According to the geoelectric sections, there is a lower layer with low and very low resistivity's, which indicates that the aquifer is highly mineralized in the littoral zone, a situation that denotes to the seawater intrusion processes.

Keywords: Groundwater depletion, La Yarada aquifer, hydrogeology, seawater intrusion.

Recibido: 07/07/2017

Aceptado: 20/03/2019

Introducción

2019, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

La rápida expansión económica genera serios problemas al empleo de aguas subterráneas en zonas áridas que por lo normal tienen altas tasas de agotamiento. La integración de las investigaciones hidroquímicas que implican análisis químicos y estadísticos se llevan a cabo para evaluar los factores que controlan la hidroquímica y contaminación potencial en una región árida. La distribución espacial de nitrato muestra que la contaminación por nitratos es un problema persistente que afecta una amplia zona del acuífero (El Alfy, Aref, Fathy, & Abdulaziz, 2017).

La necesidad de satisfacer la creciente demanda de agua es la principal impulsora de la recarga gestionada de los acuíferos; es una técnica estándar para reponer y/o mejorar la disponibilidad de los recursos hídricos subterráneos. Uno de los objetivos de la recarga del acuífero es proporcionar acuíferos con buena calidad de agua, incluso cuando se utiliza agua de menor calidad para recargar el acuífero, como efluentes de plantas de tratamiento o agua de escorrentía (Valhondo *et al*., 2016).

Los principales acuíferos del mundo de los que dependen cientos de millones de personas se agotan a un ritmo alarmante, según datos obtenidos a través de los satélites *Grace* y hechos públicos por la NASA. De los 37 acuíferos más grandes repartidos por todo el mundo, desde la India y China hasta EUA o Francia, 21 de ellos han superado su punto de sostenibilidad, lo cual significa que de ellos se ha extraído ya más agua de la que se ha incorporado a lo largo de los diez años de observación. El estudio de la NASA confirma las sospechas que tenían numerosos investigadores, especialmente en los casos de acuíferos que no son recargables por la lluvia (Todd, 2015).

El cambio climático está afectando la producción y rentabilidad de los sistemas agrícolas, y se teme que continúe en el futuro. Las proyecciones muestran aumento de la temperatura; cambios en los ciclos de precipitación; mayor frecuencia de eventos meteorológicos extremos, como huracanes y sequías; disminución de la humedad superficial del suelo, y desplazamiento de las poblaciones de plagas (Vergara, Ríos, Trapido, & Malarín, 2014).

La región Tacna está ubicada en la zona más árida de la costa peruana, y corresponde a la cabecera del desierto de Atacama, caracterizándose por la escasez de recursos hídricos, lo cual dio lugar a que desde hace varias décadas se utilicen las aguas subterráneas existentes en el subsuelo del valle de Caplina, y en especial de las pampas de La Yarada para el desarrollo de la agricultura y otras actividades económicas. Sin

2019, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

embargo, el acuífero, debido a la falta de un programa de explotación, se ha sobreexplotado (Pino, Chávarri, & Ramos, 2018), lo que ha traído como consecuencia un gradual y permanente descenso del nivel freático, comprometiendo sus reservas no renovables; ello ha causado el fenómeno de intrusión marina debido a la alta concentración de pozos de explotación de aguas subterráneas en la zona próxima a la línea del mar. Según estudios realizados por la Autoridad Nacional del Agua (ANA) (2010), se determinó un área crítica de degradación de la calidad del agua subterránea en el acuífero, que comprende unos 131 km^2 (60 km^2 correspondientes a intrusión marina), donde se ubican los valores más altos de sodio; ello indica un aumento paulatino de este ion en respuesta a la mayor penetración de la cuña salina en las zonas más cercanas a la costa y por otros factores diferentes en otras áreas.

En tal sentido, se pretende determinar los factores que inciden en el agotamiento y la contaminación por intrusión marina en el acuífero costero de La Yarada, Perú, caracterizando hidrogeológicamente el acuífero, y explicando la asociación entre geología, hidroquímica, geofísica y otras herramientas utilizadas para caracterizar acuíferos.

Materiales y métodos

Se procedió a recopilar información histórica de estudios, reportes e informes técnicos; se participó en las campañas de monitoreo y muestreo; y se procedió a efectuar el análisis de las interrelaciones entre clima, geología, hidroquímica, geofísica y calidad de agua existente en el sistema acuífero. Con este enfoque integrado se buscaron las interacciones entre los elementos mencionados para explicar la respuesta (interacciones externas e internas para explicar la calidad de agua en el acuífero); por tanto, en tal enfoque se enmarca este trabajo. Así, la caracterización hidrogeológica, los elementos ambientales, geológicos y antrópicos permitirían explicar la calidad de agua resultante en el acuífero de La Yarada, su agotamiento y relación con la intrusión marina.

2019, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Recopilación de información y fuente de datos

El acuífero de La Yarada se ha estudiado desde hace muchos años por diferentes instituciones públicas y privadas, como el Instituto Geológico Minero Metalúrgico (INGEMMET); la Autoridad Nacional del Agua (ANA); el Gobierno Regional Tacna (GORE), y el Proyecto Especial Tacna (PET), entre otros. Asimismo, se tomó referencia de entidades normativas, como la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento de Perú (Sunass).

Los autores del artículo participaron en varias campañas de monitoreo y en equipos encargados de los estudios del acuífero; y llevaron a cabo trabajos de campo para verificar la información geológica, hidrológica, geofísica y de calidad de agua, contrastando con mediciones *in situ* realizadas en los puntos de mayor interés.

Descripción del área de estudio

El acuífero costero de La Yarada se ubica en la región Tacna, al sur de Perú, límite con Chile y Bolivia (Figura 1), región caracterizada por escasez de agua superficial, condición que se ha visto agudizada en las últimas décadas debido a la frecuente ocurrencia de sequías; la ampliación de la frontera agrícola, con la consecuente incorporación de nuevos pozos de explotación de aguas subterráneas, y el acelerado crecimiento poblacional de la ciudad de Tacna.

2019, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

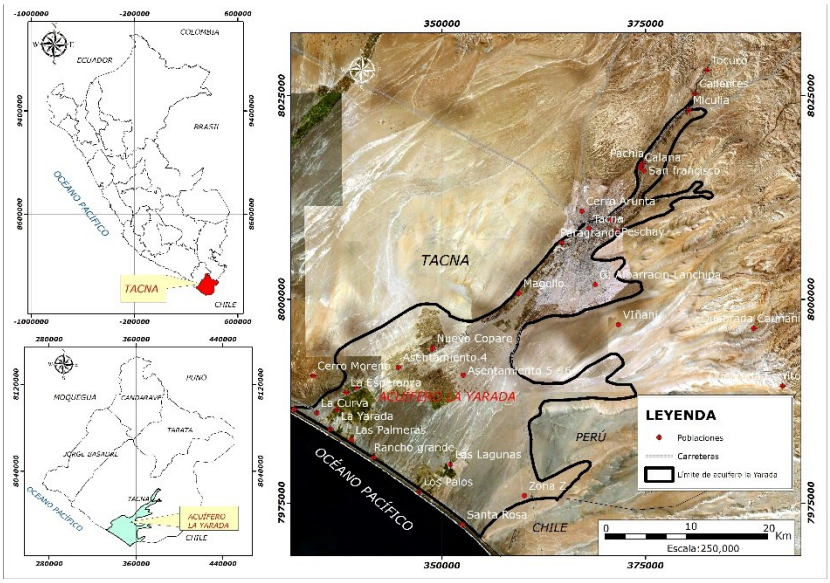


Figura 1. Mapa de ubicación de la zona de estudio.

El acuífero de La Yarada, ubicado en la cuenca Caplina de la región Tacna, se localiza en la cabecera del desierto de Atacama. Presenta un clima desértico. Las precipitaciones anuales son escasas y pueden llegar a ser nulas. Las precipitaciones más altas registradas en las estaciones Palca y Toquela en los últimos 20 años alcanzaron los 129 mm por año. La precipitación que genera escorrentía se da en la unidad geomorfológica Cordillera, la cual presenta minerales de origen volcánico, ricos en arsénico, boro, hierro, aluminio y manganeso; a esto se suma la condicionante climática, que alcanza temperaturas mínimas de -15 °C en invierno y a los efectos de la radiación solar de día, que hace que la roca se altere y sea más susceptible a la meteorización y erosión fluvial. Por esta razón, el agua que precipita se combina con los sedimentos producto de la erosión, con alto contenido de azufre, cobre y otros metales, que constituyen una fuente natural de contaminación del río Caplina. Además de presentar metales sulfurados, disminuye el pH del agua, y provoca que el agua tenga mayor poder de disolución. La temperatura presenta poca variabilidad interanual, la media anual es de 12 °C a 3 000 msnm, con máximas de 22 °C en verano y mínimas de 4 °C en invierno; para altitudes mayores de 4 000 msnm, la media

2019, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

alcanza 3 °C, máximas de 20 °C en verano y mínimas de -15 °C en invierno.

La región Tacna, geográficamente, al encontrarse ubicada en la cabecera de desierto de Atacama, es deficitaria en disponibilidades hídricas. Esta situación se evidencia al hacer una comparación con las descargas medias mensuales de los ríos de la costa peruana (Figura 2) de acuerdo con reportes efectuados para la zona de estudio.

2019, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

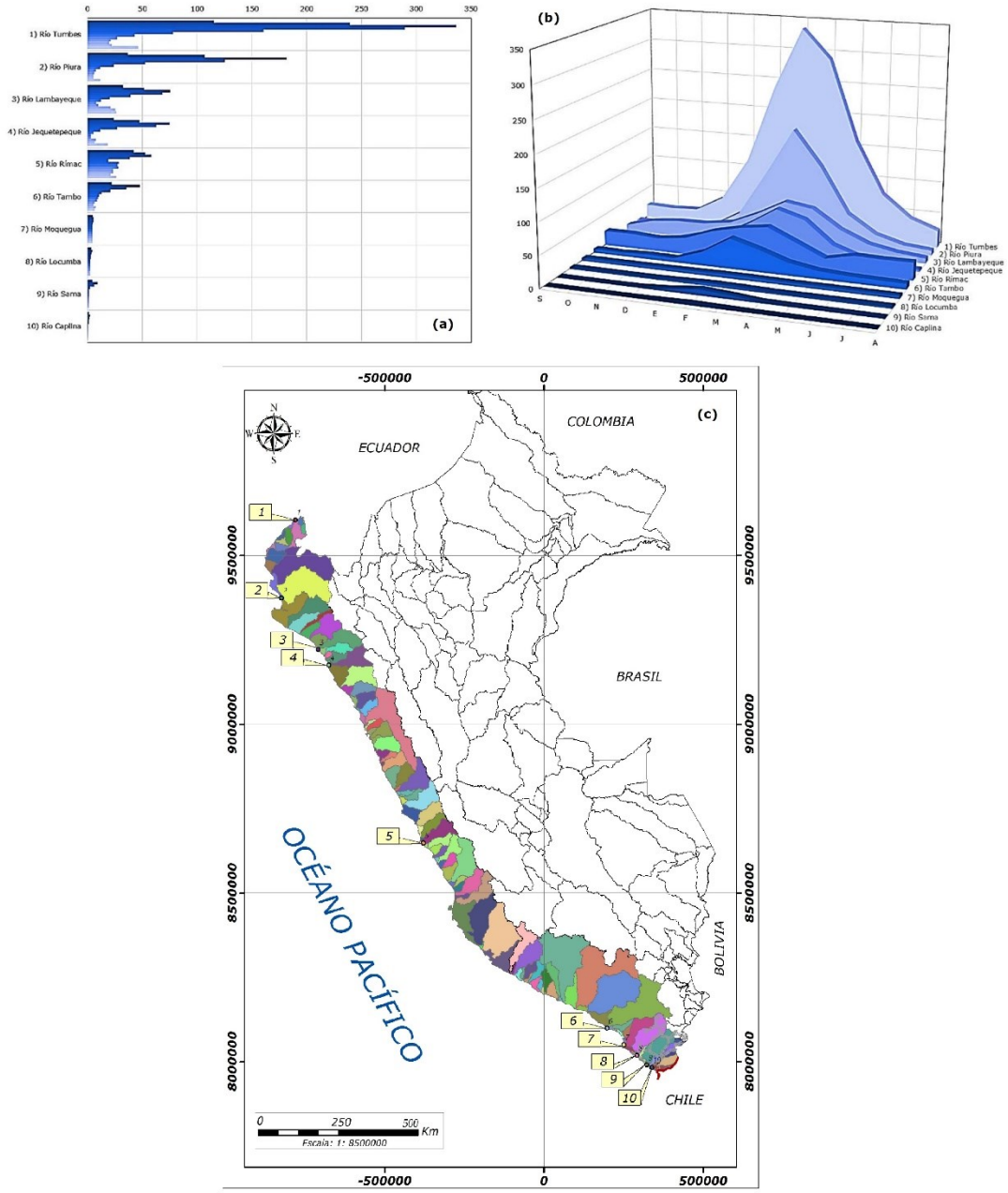


Figura 2. Descargas medias mensuales, representación 2D (a); representación 3D (b); mapa de ubicación (c), de los ríos de la costa peruana.

2019, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Frente a esta situación de baja disponibilidad de agua para las actividades económicas en la zona de estudio, el número de pozos se fue incrementando. Así, a inicios de la explotación del acuífero, en 1967, se registraron 31 pozos que explotaron 13 Hm^3.

Posteriormente, con el funcionamiento de la hidroeléctrica de Aricota, se inició la electrificación de los equipos de bombeo de los pozos existentes y se realizó la perforación de pozos a mayor profundidad; en 1971 se registraron 55 pozos que explotaron 27 Hm^3.

En 1976 se registran 70 pozos que explotaron 30 Hm^3 y los años subsiguientes. Con inversiones del Estado se pusieron en operación los asentamientos 3, 4, 5 y 6 de La Yarada Media, así como otros efectuados con capitales privados, incrementándose el número de pozos operativos a 127 en el año 2003, explotándose un volumen de 63 Hm^3.

En 2009 se inventariaron 251 pozos en explotación, que registraron un volumen explotado de 111 Hm^3. En 2013 se reportan 502 pozos con un volumen de explotación de 116 Hm^3; este volumen corresponde únicamente a los pozos con licencia de uso (PET, 2013). Del total de los 502 pozos inventariados en explotación, 105 tienen licencia de uso y 397 no la tienen, configurándose como pozos no autorizados.

La explotación creciente obedece a una relación directa del incremento en la superficie irrigada en la zona de estudio (Figura 3). En el perfil longitudinal de la cuenca Caplina se observa el desarrollo altitudinal desde los 5 000 hasta los 0 msnm en la línea de playa. Es notoria la alta pendiente de la cuenca alta y media, reduciéndose de forma considerable en la parte baja de la cuenca donde se encuentra emplazado el acuífero La Yarada (Figura 4).

2019, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

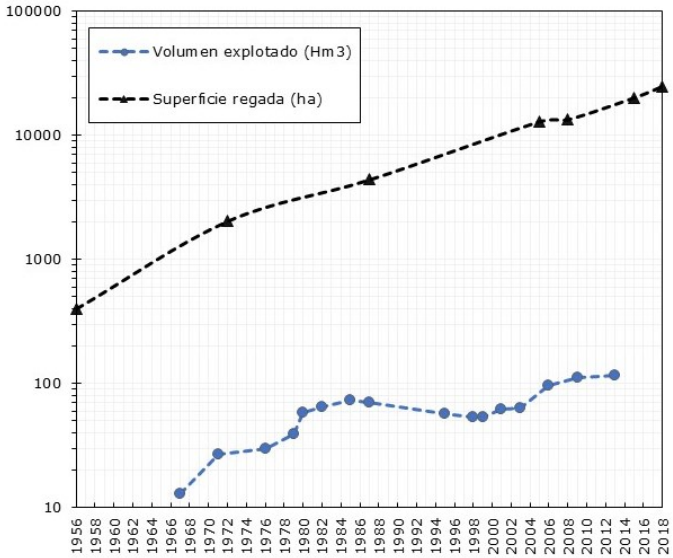


Figura 3. Evolución del volumen explotado y superficie irrigada.

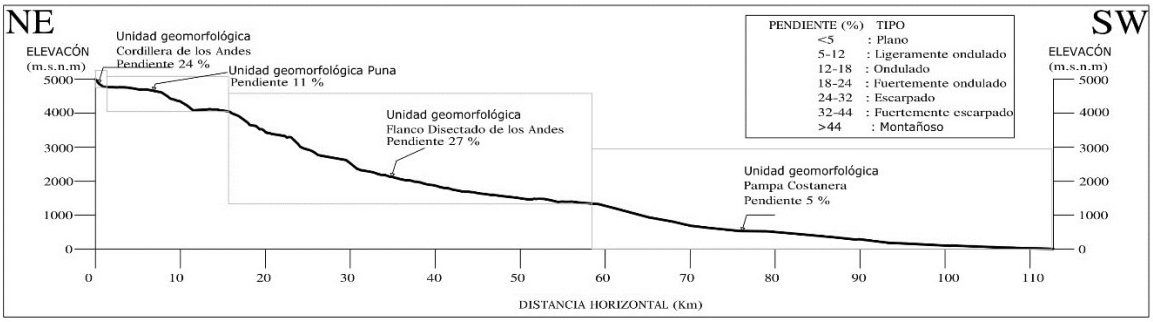


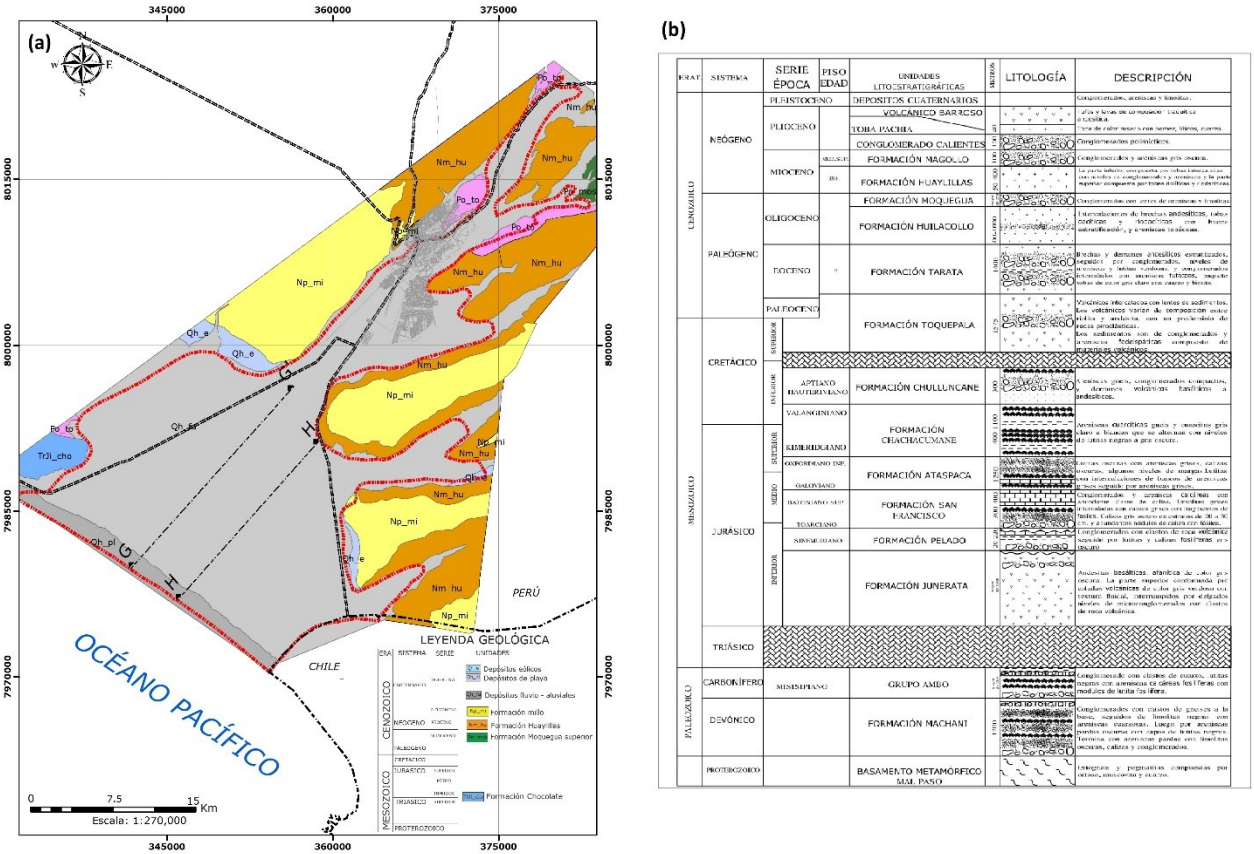
Figura 4. Perfil longitudinal de la cuenca del río Caplina.

Según ANA (2011), el acuífero se encuentra sobreexplotado: la descarga es mayor a la recarga; esto se manifiesta por el constante descenso del nivel freático. El progresivo avance de la intrusión marina alcanza 60 km2 en superficie y la degradación de la calidad del agua en un área de 127 km^2, que comprende los sectores Los Palos, El Chasqui y Los Olivos, incluyendo La Esperanza, Las Palmeras y Rancho Grande; el volumen de la reserva renovable se encuentra en el orden de los 54 Hm^3/año y la explotación es de 111 Hm^3/año; por tanto, la sobre explotación llega a los 57 Hm^3/año.

2019, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Geología y estratigrafía

El levantamiento geológico de los cuadrángulos de La Yarada y Tacna, ubicados en el departamento de Tacna, comprende una extensión de 2 320 km^2 (Figura 5a). En la Figura 5b se muestra la columna estratigráfica de la cuenca del río Caplina. A continuación se describen las unidades geológicas: Volcánico Chocolate (Ji-ch), Formación Moquegua (Po_mos), Formación Huaylillas (Nm_hu), Formación Millo (Np_mi), Depósitos fluvio-aluviales (Qh_fa), Depósitos de playa (Qh_pl) y Depósitos eólicos (Qh_e).



Tecnología y ciencias del agua, ISSN 2007-2422, 10(5), 177-213. DOI: 10.24850/j-tyca-2019-05-07

2019, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Figura 5. Mapa geológico (a); columna estratigráfica representativa (b), de la cuenca del río Caplina.

- Volcánico Chocolate (Ji-ch): descrito por primera vez por Jaén, Ortiz y Wilson (1963), utilizando la nomenclatura que Jenks (1948) propuso en Yura, Arequipa. Las últimas revisiones por parte del INGEMMET describen los afloramientos de la formación Chocolate como una intercalación de rocas volcánicas y sedimentarias ubicadas en el extremo SO de la Cordillera de la Costa (Acosta, Mamani, Alván, & Rodríguez, 2012).
- Formación Moquegua (Po_mos): conformada por materiales detríticos que disminuyen en tamaño de grano hacia el suroeste. En las zonas proximales de la cuenca, es decir, cercanas a la fuente de aporte entre los cerros Pirámide, Jachacollo, Colorado, Condorire, Piedras Anchas, y en el fondo de las quebradas Viñani y Cauñani al norte y noroeste de los cuadrángulos de Tacna y Huaylillas aparecen sucesiones estratigráficas gruesas (Acosta *et al*., 2012).
- Formación Huaylillas (Nm_hu): descrita por tres miembros: inferior, medio y superior. El inferior está compuesto por tobas rosáceas con abundantes fragmentos líticos y fragmentos de pómez intercalados con niveles de conglomerados con clasto de roca sedimentaria y volcánica subredondeada. El miembro medio comprende una sucesión de tobas riolíticas y riodacíticas de color rosáceo, con fragmentos de pómez y líticos, intercalados con delgados niveles de areniscas masivas de color verde (Acosta *et al*., 2012). Según los estudios realizados por Flores y Sempere (2002), y Flores, Sempere y Fornari (2004), los sedimentos del miembro superior constan de conglomerados y areniscas de coloración gris oscura, con clastos mayormente andesíticos y delgados niveles evaporíticos.
- Formación Millo (Np_mi): se encuentra aflorando esencialmente en el fondo de las quebradas a manera de zonas amplias y planas que sirven como base a los ríos Caplina, Sama, Hospicio y Escritos. Su relación de piso está dada por el grado de erosión de la quebrada, observándose que por la zona norte del cuadrángulo de Tacna, por los cerros Perdido y Pirámide, se encuentran

2019, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

sobreyaciendo en contacto erosivo a la formación Moquegua superior (Acosta *et al*., 2012). El tamaño de sus clastos disminuye hacia el suroeste, aumentando también el espesor de los estratos. Esta variación se observa en la mayoría de pozos exploratorios perforados en las pampas de La Yarada (Martines, Vargas, Montoya, Chamorro, & Zenteno, 1996; Acosta, Benavente, Cotrina, Peña, & Alván, 2008).

- Depósitos fluvio-aluviales (Qh_fa): constituyen principalmente los horizontes permeables y explotables de agua subterránea, alcanzando espesores hasta de 446 m. Litológicamente están constituidos por conglomerados, arenas y arcillas que se intercalan irregularmente. En el área de estudio estos depósitos constituyen el cono de deyección del río Caplina y sus tributarios.
- Depósitos de playa (Qh_pl): estos depósitos no tienen mayor incidencia en la hidrogeología del área, debido principalmente a su carácter marginal, y por constituir una franja de arenas y cantos muy angosta, la cual se encuentra distribuida a lo largo del litoral, y que está relacionada con escarpas litorales emergidas.
- Depósitos eólicos (Qh_e): acumulaciones de arena de origen eólico que se encuentran en las pampas de La Yarada y Hospicio, formando una delgada cubierta discontinua, que algunas veces constituye dunas y médanos.

El medio acuífero

Se ha podido determinar que el acuífero es principalmente de origen aluvial de edad cuaternaria; tiene la forma de un polígono rectangular de fondo plano, y con flancos escarpados y abruptos. Aguas abajo, el cono deyectivo del río Caplina constituye una unidad fisiográfica que se inicia en la garganta de Magollo, y se ensancha progresivamente hacia abajo en forma de delta hasta alcanzar la línea de playa. El acuífero está delimitado desde Calientes hasta la línea de playa en sentido noreste a suroeste por afloramientos rocosos, con incipiente cobertura eólica,

2019, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

también por depósitos de cenizas volcánicas (parte superior). Los espesores del acuífero (ANA, 2009) son Calientes-Calana (139 m), Calana-Pocollay (121 m), Tacna-Magollo (86 m), Pampas San Francisco (493 m) y Viñani (316 m).

El acuífero está constituido sobre todo por rellenos aluviales de edad cuaternaria. Litológicamente está conformado por gravas, arenas finas a gruesas; cantos que varían de redondeados a subredondeados; limos y arcillas, todos de carácter típicamente fluvial. Hacia los sectores noroeste y sureste, los sedimentos provienen principalmente de las formaciones Huaylillas y Moquegua; por efecto del viento, las arenas sufren movimientos y llegan a conformar parte del acuífero. Tiene como fuentes principales de alimentación las filtraciones de agua que se producen en el río Caplina, canal Uchusuma, y los aportes de agua según ocurrencia de lluvias de las quebradas de Palca, Vilavilani, Viñani, Cauñani, Espíritus y Quebrada Honda, que discurren e infiltran en el valle y las pampas de La Yarada. Por otro lado, se tiene la infiltración de agua que se produce en la zona húmeda, parte alta de la cuenca; y a través de fracturas o fallas de rocas, pasando después a los materiales clásticos de los depósitos cuaternarios.

Para el análisis de la morfología de la superficie freática, se dividió en cuatro zonas que se muestran en la Figura 6ª; en la Figura 6b se tienen los parámetros hidrodinámicos promedio para cada zona del acuífero (ANA, 2010). En las zonas I, II, III y IV, el flujo subterráneo mayormente presenta orientación de noreste a suroeste, fluctuando su gradiente hidráulico entre 0.20% (zona IV) y 2.75% (zona I). En ciertos sectores de la zona III (Yarada Antigua), como La Esperanza y San Antonio, el sentido del flujo subterráneo se invierte y tiene una dirección del mar hacia tierra adentro (suroeste a noreste), observándose además cotas del agua negativas, lo cual es producto de la explotación intensa en ese sector, ocasionando el fenómeno de intrusión marina. La Tabla 1 muestra las características de la morfología de la superficie freática.

2019, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

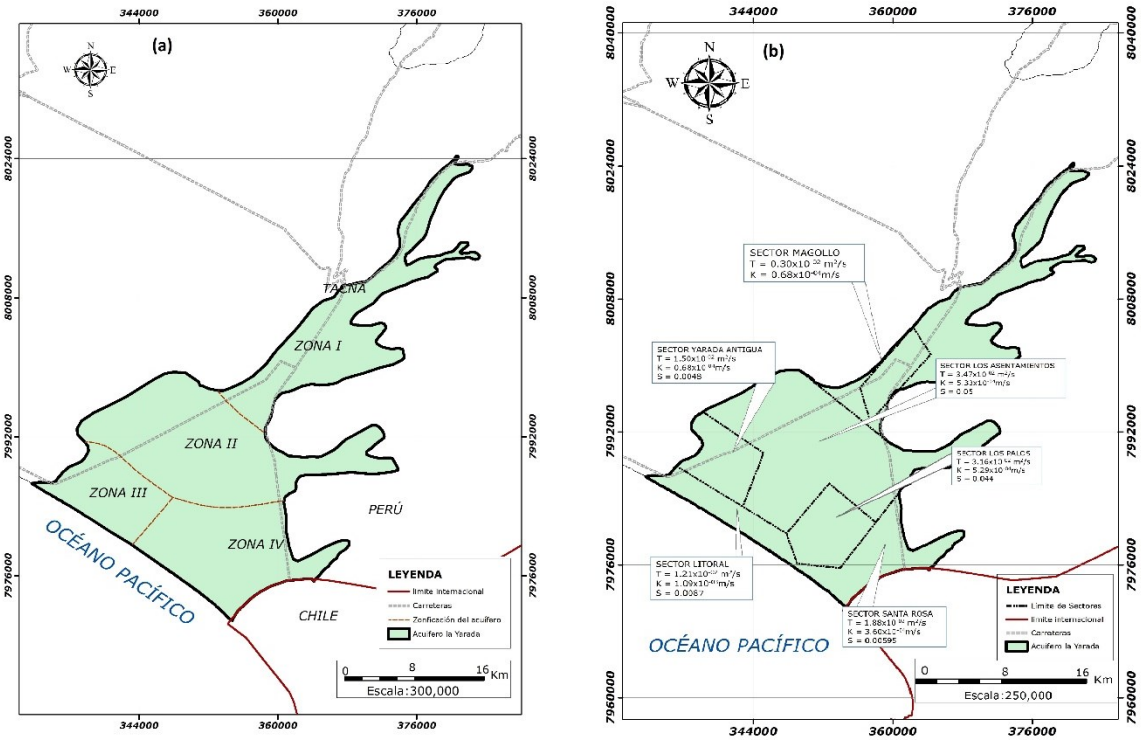


Figura 6. Mapa de zonas del acuífero (a), parámetros hidrodinámicos promedio (b), del acuífero La Yarada.

Tabla 1. Características del acuífero freático.

Zona	Sector	Sentido	Gradiente	Rango Cota
I	Pocollay-Tacna	NE a SO	2.50	300 – 600
	Para-Viñani	NE a SO	1.25	280 – 330
	Magollo	NE a SO	2.75	170 – 280
II	El Hospicio	N a S	1.50	45 – 120
	Yarada Alta	NE a SO	1.40	45 – 145
	Irrigación Copare	NE a SO	1.52	35 – 165
III	La Esperanza-Fdo. Valdivia	NE a SO	0.47	6 – (-10)
	Yarada Antigua-Fdo. Valdivia	SO a NO	-0.22	(-10) – 0.50
	Yarada Media	NE a SO	0.26	8 – 0
	Rancho Grande	NE a SO	0.02	0 – (-0.20)
IV	Los Palos-Asociación San Pedro	NE a SO	0.24	(-0.50) – 20
	Las Salinas-Balneario Santa Rosa	NE a SO	0.20	20 – 0

Las variaciones del nivel de agua por lo general tienen comportamiento estacional; la evaluación se realizó teniendo en cuenta los periodos críticos de estiaje de los ríos y las precipitaciones mínimas ocurridas en

2019, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

la parte alta de la cuenca del Caplina, que son las principales fuentes de recarga del acuífero. En la zona I se tiene un descenso promedio de 0.40 m/año; en la zona II, descensos entre 0.54 y 1.14 m/año; en la zona III, descensos promedio entre 0.13 y 0.30 m/año; en la zona IV, descensos entre 0.03 y 0.43 m/año.

En la Figura 7 se muestran las variaciones interanuales en las diferentes zonas del acuífero entre los años 1999 y 2015: en la zona I se tiene un descenso medio de 5.2 m; en la zona II, de 7.6 m; en la zona III, de 9.3 m; en la zona IV se tiene un descenso medio de 4.6 m. Las zonas II y III registran los mayores descensos en el periodo analizado.

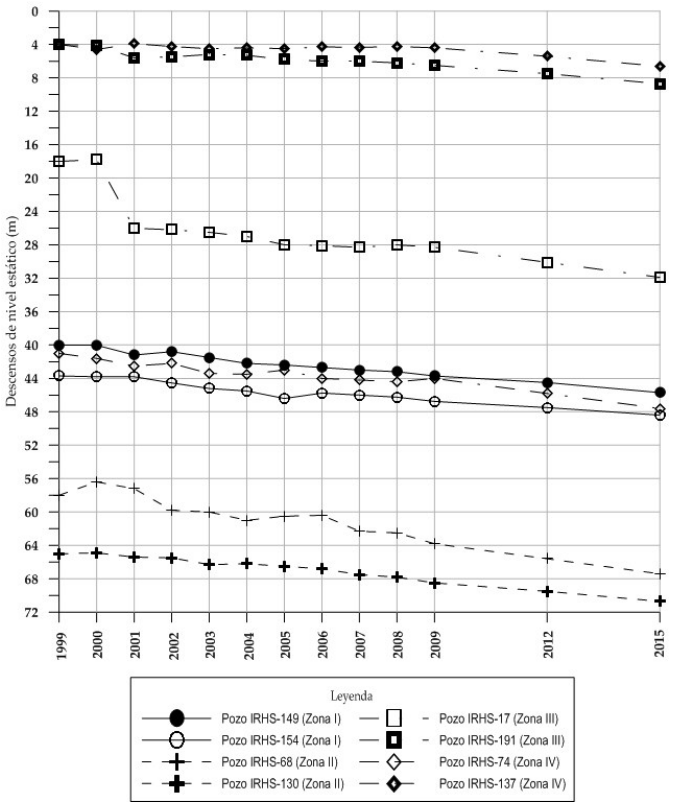


Figura 7. Variación de niveles de la superficie freática.

Hidroquímica

2019, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Con base en la hidroquímica se buscaron respuestas acerca del origen y distribución del agua subterránea; los procesos físico-químicos que afectan al agua, y la calidad de la misma; esto es, degradación y presencia de contaminantes. Tal información es esencial para establecer la evolución del acuífero en el tiempo y el espacio; evaluar la vulnerabilidad del acuífero; detectar afecciones, y establecer las medidas correctoras para la contaminación, salinización y pérdida de calidad, y así poder gestionar el recurso hídrico. Se estableció un análisis comparativo espacial y temporal de los principales parámetros entre 2010 y 2016.

En la cuenca Caplina, donde se encuentra emplazado en acuífero de La Yarada, el agua de lluvia que recarga el acuífero tiene escaso contenido iónico; en la escorrentía superficial y a través de la zona no saturada y la zona saturada hay una interacción agua-fase sólida por la que el agua va adquiriendo sustancias químicas como especies disueltas (Pino *et al*., 2017). Durante el inventario de pozos se realizaron los análisis del agua *in situ* en 261 pozos que se encontraban en funcionamiento en 2016, en las cuales se midieron datos del agua sobre temperatura, conductividad eléctrica y potencial de hidrógeno; se tomaron muestras en 55 de ellos y se analizaron en laboratorio los iones Ca++, Mg++, Na+, K+, Cl-, SO4=, HCO3- y CO3=.

Resultados y discusión

Las variaciones de los niveles freáticos por lo general tienen comportamiento estacional; es decir, varían de acuerdo con la época del año; ascendiendo mayormente en los meses de verano (enero-marzo), lo cual se debe de manera fundamental a las precipitaciones en la zona alta de la cuenca, ocurriendo lo contrario en la época de estiaje: el acuífero va disminuyendo su recarga por efecto de la escasa precipitación y, en consecuencia, los niveles de agua descienden.

2019, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

La evaluación del acuífero freático se realizó teniendo en consideración los periodos críticos de estiaje de los ríos y las mínimas precipitaciones ocurridas en la parte alta de la cuenca del Caplina, que son las principales fuentes de recarga del acuífero. La Figura 8 muestra la disposición de las isopiezas del acuífero en dos periodos: 2010 y 2016, representándose direcciones de flujo predominantes y las zonas con niveles por debajo del nivel del mar, estrechamente ligadas con procesos de intrusión marina. Los pozos de extracción de agua subterránea en esta zona afectada reportan valores altos de salinidad. Respecto al tiempo, de 2010 a 2016 se observa un incremento significativo de descensos de los niveles freáticos.

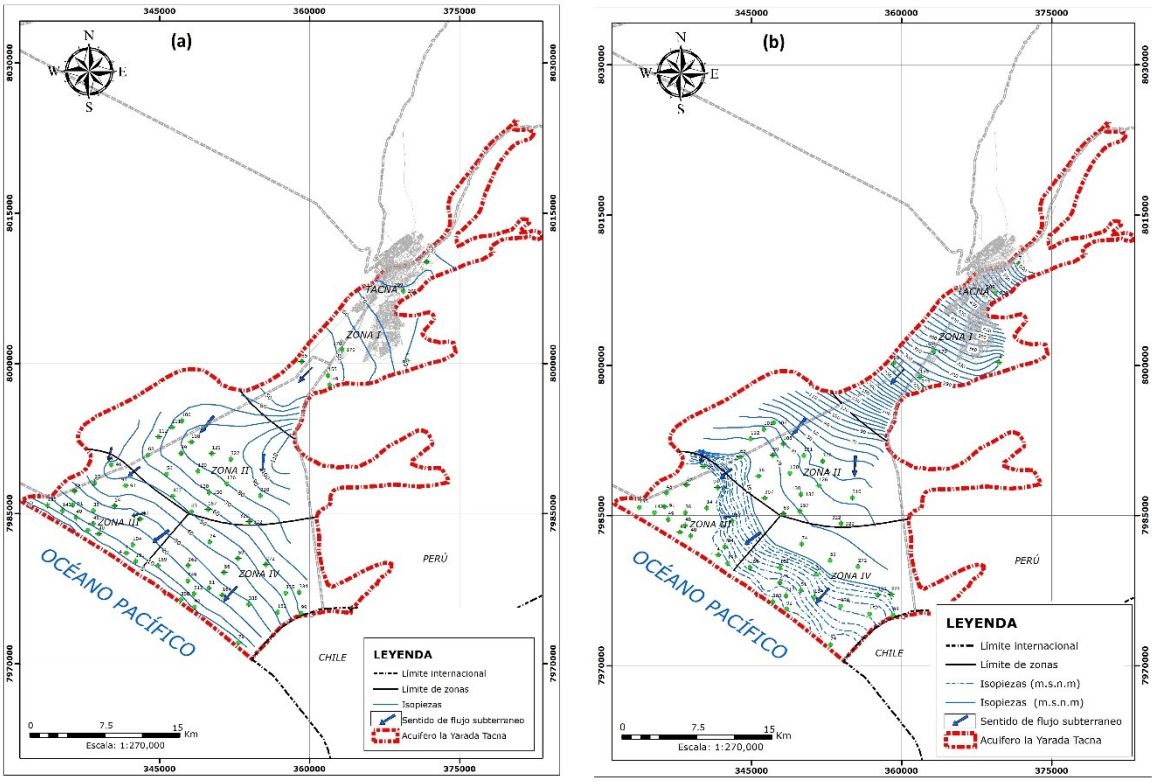


Figura 8. Mapa de isopiezas del acuífero La Yarada: (a) 2010, (b) 2016.

2019, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Los resultados de los análisis físico-químicos de las muestras de agua que se recolectaron en el área de estudio se agruparon por zonas (I a IV) y su análisis e interpretación se describe a continuación.

Conductividad eléctrica

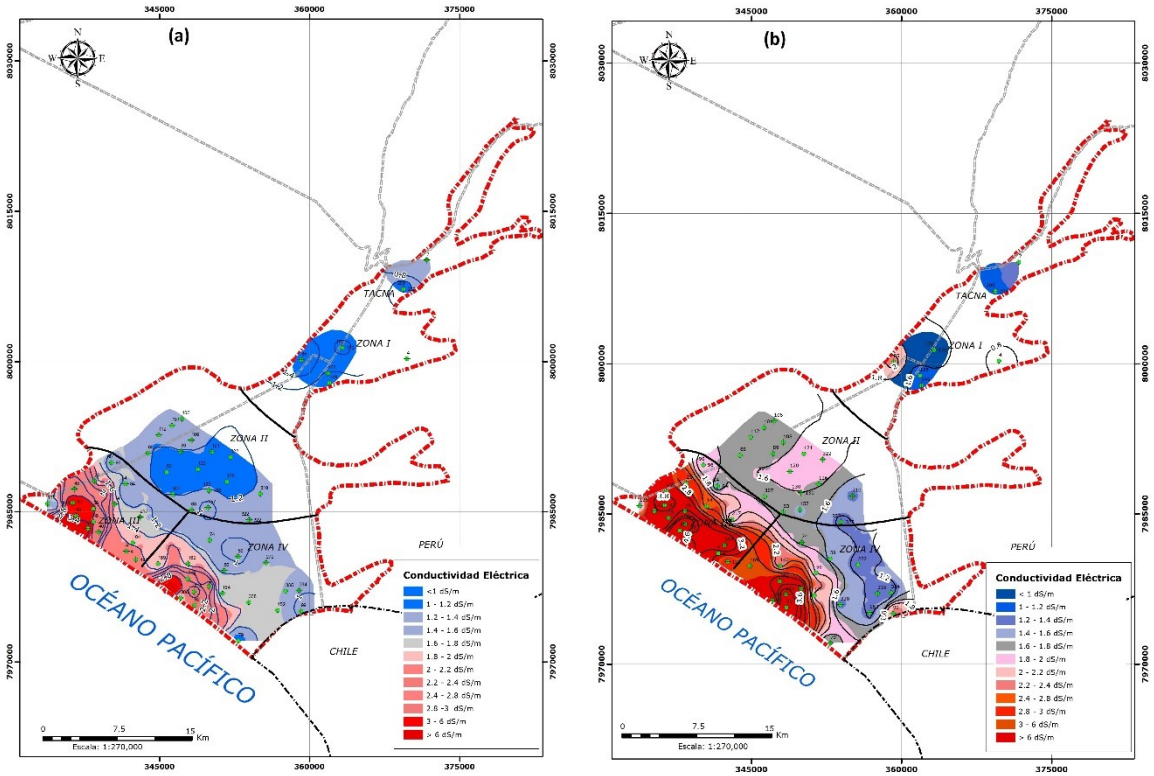
La conductividad eléctrica es una buena medida del riesgo de salinidad para los cultivos. El valor normal oscila entre 0.044 y 0.648 dS/cm (Eyankware, Obasi, & Akakuru, 2016). En la Tabla 2 se muestran los valores obtenidos. En la zona I, entre 0.56 y 2.18 dS/cm, representando aguas de media, alta y muy alta mineralización. En la zona II, de 0.96 y 1.81 dS/cm, que clasifican como aguas de alta mineralización. En la zona III, entre 1.32 y 7.13 dS/cm, aguas de alta, muy alta mineralización (aguas salobres) y aguas saladas. En la zona IV, de 0.84 a 7.95 dS/cm, clasificándose como aguas de alta, muy alta mineralización (aguas salobres) y aguas saladas (Figura 9). Los resultados mostrados en los mapas de isoconductividad (2010 y 2016) muestran un incremento de este parámetro en el espacio y tiempo.

Tabla 2. Valores de conductividad eléctrica.

Zona	Sector	Conductividad	Clasificación
I	Hospicio-Irrigación Magollo	0.61-2.18	Media, alta y muy alta mineralización
	Viñani	0.56-0.96	
	Pocollay (Sobraya)-Cercado Tacna	0.62-1.74	
II	Asentamiento núm. 3-Copare	1.00-1.42	Alta mineralización
	Asentamientos núm. 5 y 6-AA HH Pachacútec	1.81-1.58	
	Límite Hospicio-Zona “Z”	1.77-0.96	

2019, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

III	La Esperanza-Fundos (Valdivia)	1.53-2.61	Alta, muy alta mineralización (aguas salobres) y aguas saladas
	Yarada Antigua-Las Palmeras	3.30-7.13	
	Los Olivos-El Progreso-La Noria	1.32-1.65	
	Fundo Virgen Chapi-Rancho Grande	1.37-5.32	
IV	Complejo Aduanero-Obelisco Concordia	0.84-2.30	Alta, muy alta mineralización (aguas salobres) y aguas saladas
	Curva Los Palos y Salinas	0.94-1.19	
	Asociación Perú Posible y Frontera del Sur	1.11-1.45	
	Los Palos (parte baja)-Asociación San Pedro-Macheros	1.37-7.95	
	Cenizales y Balneario Santa Rosa	0.89-3.01	



2019, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Figura 9. Mapa de isoconductividad del acuífero La Yarada: (a) 2010; (b) 2016.

Potencial de hidrógeno (pH)

El pH fluctúa entre 6.12 y 9.33, valores que representan desde aguas ácidas a altamente alcalinas (OMS, 2006; Sunass, 1995). En la zona I, el agua es ligeramente ácida a ligeramente alcalina, con valores de 6.56 a 7.52. En la zona II, entre 6.73 y 7.83, valores que corresponden a aguas ligeramente acidas a alcalinas. En la zona III, de 6.12 a 9.33, valores que corresponden a aguas ácidas a altamente alcalinas. En la zona IV, entre 6.25 y 8.22, siendo aguas identificadas como ácidas a alcalinas (Tabla 3).

Tabla 3. Clases de agua según el potencial de hidrógeno (pH).

Zona	pH	Clasificación
I	6.56-7.52	Ligeramente ácidas a ligeramente alcalinas
II	6.73-7.83	Ligeramente ácidas a alcalinas
III	6.12-9.33	Ácidas a altamente alcalinas
IV	6.25-8.22	Ácidas a alcalinas

Dureza

2019, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

La dureza total de las aguas en el área de estudio varía de 171.5 a 3 021.5 ppm (CaCO3), valores que representan aguas ligeramente duras a muy duras (OMS, 2006; Sunass, 1995). En la zona I, de 171.5 a 827.5 ppm, valores indicativos de aguas ligeramente duras a muy duras. En la zona II de 295.5 a 776.5 ppm, identificadas como aguas moderadamente duras a muy duras. La zona III, de 210 a 3021 ppm, valores que indican aguas ligeramente duras a muy duras. En la zona IV, de 263 a 2419 ppm, valores que representan aguas moderadamente duras a muy duras (Tabla 4).

Tabla 4. Clases de agua según dureza.

Zona	Dureza	Clasificación
I	171.50-827.00	Agua ligeramente dura a muy dura
II	295.50-776.50	Agua moderadamente dura a muy dura
III	210.00-3021.50	Agua ligeramente dura a muy dura
IV	263.50-2419.00	Agua moderadamente dura a muy dura

Principales cationes y aniones

Los valores encontrados del ion de calcio (Ca++) oscilan entre 58 mg/l (zona I) y 927 mg/l (zona III); para el ion magnesio (Mg++) se encontraron valores que oscilan entre 5.88 mg/l (zona IV) y 168.96 mg/l (zona III); el sodio (Na+), entre 42.09 mg/l (zona I) y 842.95 mg/l (zona IV); el potasio (K+) reporta valores que oscilan entre 2.34 mg/l (zona I) y 38.22 mg/l (zona III), este valor sobrepasa los valores esperados en las aguas subterráneas, lo que denota presencia de salmueras.

Los valores encontrados del ion de cloruro oscilan entre 69.23 mg/l y 1846.71 mg/l (zona III) (Figura 10). El sulfato (SO4=) presenta valores que oscilan entre 119.23 mg/l y 2 557.69 mg/l (entre zonas I y IV). Los valores encontrados del ion de bicarbonato (HCO3-) oscilan entre 56.12 mg/l y 184.83 mg/l (entre zona II y I). Los resultados de parámetros

2019, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

analizados para las 55 muestras de agua subterránea se muestran en la Tabla 5. Los resultados mostrados en los mapas de isocloruros corresponden a los años 2010 y 2016, notándose un incremento de este parámetro en el espacio y tiempo; es posible identificar el efecto de la salinización tomando como base los cloruros en el medio acuífero, al haberse incrementado la superficie afectada entre los años analizados.

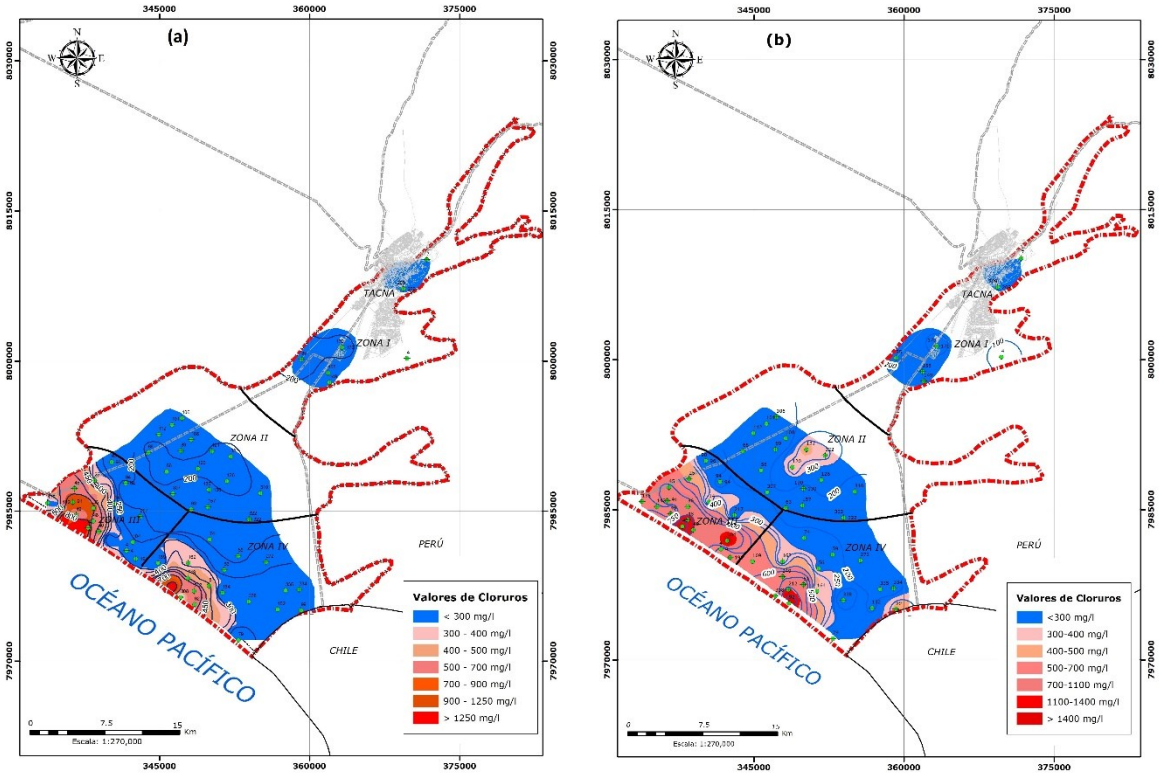


Figura 10. Mapa de isocloruros del acuífero La Yarada: (a) 2010, (b) 2016.

Tabla 5. Resultados de análisis físico-químicos.

Zona	IRHS	Cationes (meq/l)				Aniones (meq/l)				
		Ca^{++}	Mg^{++}	Na^{+}	K^{+}	Cl^{-}	$SO_4^{=}$	HCO_3^{-}	NO_3^{-}	$CO_3^{=}$
I	4	2.90	0.53	1.83	0.07	2.57	1.24	1.34	0.01	0.00

2019, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

	5	11.25	3.17	7.48	0.44	9.51	11.21	2.11	0.04	0.00
	85	12.30	4.25	5.00	0.48	5.65	14.45	1.78	0.07	0.00
	173	10.62	2.50	4.26	0.32	4.60	10.38	2.60	0.18	0.00
	209	8.74	1.52	3.87	0.06	3.66	6.71	3.03	0.04	0.00
	302	12.90	2.75	3.91	0.33	8.57	8.56	2.09	0.08	0.00
II	107	6.35	2.08	3.39	0.26	3.90	9.91	1.21	0.00	0.00
	112	4.85	1.06	6.48	0.31	4.48	8.81	0.92	0.00	0.00
	115	9.80	2.75	3.87	0.32	5.84	10.02	1.69	0.00	0.00
	130	8.95	2.25	3.61	0.32	5.65	9.75	1.59	0.01	0.00
	146	12.20	3.33	3.61	0.42	10.33	7.26	1.54	0.00	0.00
	188	6.79	1.38	2.87	0.10	3.78	6.73	1.74	0.02	0.00
	270	5.53	1.00	2.35	0.19	3.55	3.14	1.86	0.01	0.00
	307	9.32	2.50	3.61	0.38	3.90	10.20	1.44	0.02	0.00
	316	6.44	1.43	2.39	0.17	4.05	3.40	1.71	0.02	0.19
	321	9.64	1.76	3.35	0.17	6.00	5.37	1.59	0.05	0.00
	322	6.24	1.38	2.43	0.19	3.74	3.82	1.69	0.05	0.00
	331	11.00	2.58	3.96	0.34	4.91	10.42	1.98	0.04	0.00
	332	9.80	3.08	4.17	0.43	5.22	10.02	1.74	0.03	0.00
III	7	9.65	2.75	3.74	0.31	6.82	8.53	1.21	0.00	0.00
	16	7.65	2.17	3.30	0.29	5.07	8.09	1.38	0.00	0.00
	25	9.50	2.33	8.74	0.46	13.05	6.99	1.67	0.01	0.00
	36	18.70	6.75	11.43	0.65	27.08	12.45	1.46	0.00	0.00
	45	19.05	3.50	9.78	0.56	24.35	8.59	1.42	0.03	0.00
	94	5.45	2.33	4.13	0.33	3.51	4.38	1.44	0.01	0.00
	96	3.65	0.55	7.04	0.31	9.59	3.84	1.48	0.00	0.00
	142	23.30	4.42	2.26	0.64	18.70	14.81	1.44	0.02	0.13

2019, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

	191	6.20	4.92	10.65	0.51	10.13	13.17	1.80	0.01	0.13
	214	46.35	14.08	13.17	0.98	52.02	19.95	2.28	0.00	0.00
	217	5.90	2.00	4.04	0.33	1.95	8.84	1.57	0.00	0.00
	304	20.45	7.17	13.43	0.72	30.39	13.75	1.34	0.01	0.00
IV	50	12.90	3.42	6.26	0.38	14.03	10.30	1.98	0.00	0.00
	51	17.00	5.42	10.70	0.48	23.38	12.96	1.86	0.02	0.00
	57	6.75	0.67	5.09	0.07	5.84	6.34	2.38	0.11	0.00
	59	5.55	1.67	4.30	0.25	4.01	4.79	1.84	0.01	0.13
	79	6.53	1.47	3.04	0.23	3.97	4.11	1.84	0.00	0.10
	99	12.75	1.75	7.04	0.20	16.21	5.69	1.21	0.02	0.19
	152	6.12	1.38	2.74	0.12	5.26	4.59	1.48	0.08	0.08
	162	7.10	3.67	6.87	0.35	6.62	9.05	1.40	0.10	0.10
	169	10.55	4.25	8.96	0.48	12.86	10.37	1.38	0.01	0.13
	184	7.60	2.33	4.52	0.27	5.65	6.88	1.63	0.01	0.06
	192	36.30	12.08	36.65	0.97	51.63	26.60	1.69	0.04	0.10
	249	16.80	5.33	10.83	0.56	18.90	15.60	2.15	0.02	0.06
	257	6.50	1.71	2.61	0.29	4.60	4.81	1.29	0.04	0.00
	266	9.19	1.83	3.00	0.37	4.36	6.02	1.50	0.09	0.10
	272	7.10	1.00	2.83	0.19	2.81	6.27	1.61	0.00	0.00
	277	5.69	1.28	2.43	0.14	3.31	4.27	1.40	0.01	0.00
	308	9.60	3.00	5.91	0.41	8.77	9.89	1.42	0.00	0.00
	314	5.94	1.18	2.70	0.09	3.35	5.08	1.60	0.01	0.00
	315	5.41	0.94	2.83	0.11	4.33	3.34	1.66	0.02	0.00
	333	4.78	0.49	3.87	0.13	6.00	2.27	1.36	0.02	0.00
	334	5.60	0.50	4.13	0.12	6.47	2.32	1.39	0.02	0.00
	335	5.39	1.05	2.61	0.14	4.17	3.39	1.79	0.03	0.00

2019, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

	336	6.27	1.16	2.52	0.17	4.01	5.19	1.64	0.02	0.00
	338	5.70	1.41	2.91	0.23	3.51	5.46	1.54	0.01	0.00

En la zona I, según los resultados de laboratorio y los diagramas triangulares, se muestra que las aguas son sulfatadas y/o cloruradas cálcicas, y/o magnésicas. En la zona II, en general las muestras se agrupan en la región de las aguas sulfatadas y/o cloruradas cálcicas, y/o magnésicas, correspondiendo a aguas de mezcla. En la zona III, las muestras de agua mayormente se agrupan en la región de aguas sulfatadas y/o cloruradas cálcicas, y/o magnésicas, y las muestras de los pozos IRHS-96 y 191 se ubican en el rombo de las tipo clorurada y/o sulfatada sódicas (facies Na-Ca-Cl-SO4 y Na-Ca-Mg-SO4-Cl respectivamente), reflejando la zona de mezcla de agua salina y dulce en la zona interfase del fenómeno de intrusión marina que se viene dando en este acuífero. En la zona IV, la muestra del pozo IRHS-192 presenta las facies Na-Ca-Cl-SO4, indicando agua del tipo clorurada sódica (agua salina), en general en esta zona las muestras de agua corresponden a aguas clorurada y/o sulfatada cálcica, y/o magnésica (agua salina transitoria) (Figura 11).

2019, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

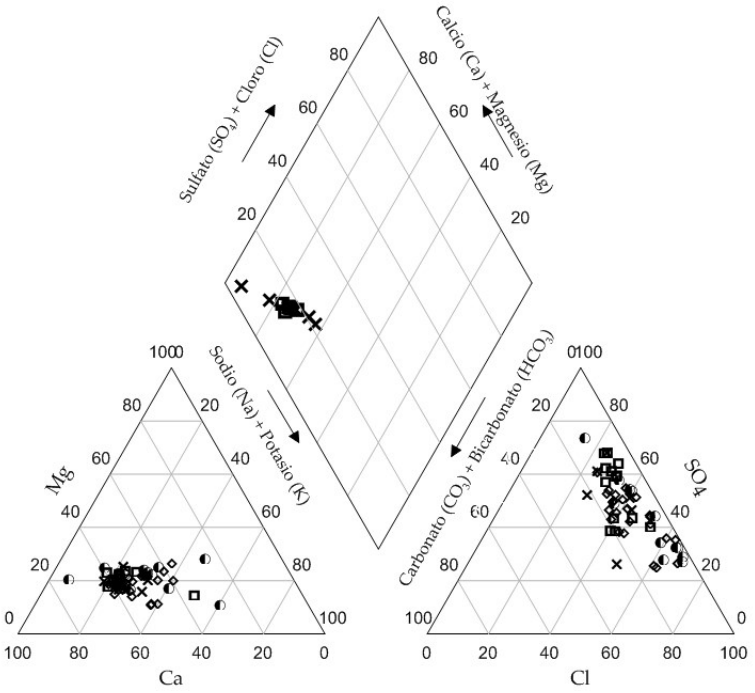


Figura 11. Diagrama de Piper.

Calidad del agua subterránea y familias hidrogeoquímicas

Las facies predominantes en el área de estudio son las sulfatadas cálcicas y cloruradas cálcicas, seguidas en menor proporción por las cloruradas sódicas y sulfatadas sódicas (Tabla 6). La importancia del agua, el saneamiento, la higiene para la salud y el desarrollo han quedado reflejados en los documentos finales de diversos foros internacionales (OMS, 2006). Recientemente, la Asamblea General de las Naciones Unidas declaró el periodo de 2005 a 2015 como Decenio Internacional para la Acción "El agua, fuente de vida".

Tabla 6. Facies hidrogeoquímicas predominantes.

2019, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Clasificación	Muestra	%
Clorurada cálcica	22	40.00
Sulfatada cálcica	30	54.54
Clorurada sódica	02	3.64
Sulfatada sódica	01	1.82
Total	**55**	**100**

El estándar de calidad del agua en relación con el boro es de 0.5 mg/l (OMS, 2006). En esta campaña, el valor mínimo presentado fue de 0.01 y el máximo de 3.72 mg/l, por tanto se tienen ciertos sectores que presentan ausencia de este elemento, como es el caso de Viñani, Curva Los Palos, Pampas Santa Rosa y otros que superan los estándares de calidad. De esta forma se tiene que 18 muestras (32.72%) de las 55 muestras de agua subterránea correspondientes a la campaña realizada se encuentran por encima del máximo permisible para agua potable establecido por la normativa vigente, ubicadas principalmente en la zona I (sector Magollo), zona II (sector Cooperativa 60), zona III (sectores La Esperanza, Los Olivos y Las Palmeras) y en la zona IV (sectores Los Palos y Los Macheros).

Con referencia al ion cloruro, se ha encontrado que 18 muestras (32.72%) están por encima del máximo permisible para agua potable establecido por la normativa peruana. Se ubican principalmente en la zona I (sector Magollo), zona II (sector Cooperativa 60), zona III (sectores La Esperanza, Los Olivos y Las Palmeras) y en la zona IV (sectores Los Palos y Los Macheros). En relación con el ion sulfato (SO4=), se puede indicar que su contenido en las aguas subterráneas analizadas, en la mayoría de las zonas sobrepasa los límites máximos tolerables de potabilidad, presentándose mayormente en los sectores 28 de Agosto y Asentamiento 5 y 6 de la zona IV; sectores La Esperanza, Los Olivos y Las Palmeras de la zona III, y el sector Los Palos en la zona II. Así, 47 muestras de agua (59%) sobrepasan la normativa vigente peruana (250 mg/l) (Sunass, 1995).

En el caso del sodio, seis muestras (8%) superan el límite máximo tolerable establecido por la OMS, y se ubican en los sectores Las Palmeras, La Esperanza y Los Palos. Con respecto al Ph, las muestras de agua analizadas varían de 6.12 a 8.21, encontrándose en esta última campaña aguas ácidas en los sectores de Los Olivos, Rancho Grande y

2019, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Los Macheros, que no se encuentran dentro del rango establecido por la OMS (6.5 a 8.5) (Tabla 7).

Tabla 7. Variación de los valores de parámetros fisicoquímicos.

Parámetro	Zona I	Zona II	Zona III	Zona IV
Boro (mg/L)	0.39-1.12	0.03-3.72	0.13-1.55	0.01-3.17
Cloruro (mg/L)	91.24-337.61	126.03-366.72	69.23-1 846.71	99.76-1 832.87
Sulfato (mg/L)	119.23-1 389.42	301.92-1001.92	369.23-1 918.27	218.27-2 557.69
Sólidos Disueltos Totales (mg/L)	280-1 180	490-965	565-3565	450-3 975
Sodio (mg/L)	42.09-172.04	54.05-149.04	51.98-308.89	55.89-842.95
pH	6.56-8.21	6.93-8.14	6.12-7.72	6.25-8.15

Intrusión marina

Se levantaron secciones geoeléctricas, siendo una de las principales la sección H-H´ (Figura 5a y Figura 12), con una longitud de 19.30 km desde la línea del litoral y pasa por los sectores Los Palos, zona Z, hasta el límite con el distrito Coronel Gregorio Albarracín Lanchipa. Asimismo, se presentan cuatro horizontes geoeléctricos principales. El primer horizonte, conformado por una o varias capas geoeléctricas, conforma el acuífero no saturado; en conjunto tiene espesores que varían desde 0.0 m en la línea del litoral hasta los 101 m **(OJO AUTOR, COTEJAR SI ESTE CAMBIO DE REDACCIÓN GUARDA LA IDEA ORIGINAL)**. El segundo horizonte es el acuífero saturado y está conformado por dos capas geoeléctricas; n conjunto sus espesores van decreciendo desde 359 m en el litoral hasta los 161 m; a partir de este punto se incrementan los espesores hasta llegar a 279 m y desde aquí

2019, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

nuevamente los espesores disminuyen hasta llegar a 87 m; la capa superior, donde predominan las resistividades medias, van desde 11 hasta 20 ohm-m, y los espesores varían de 88 a 279 m, donde se abarca todo el espesor del acuífero saturado; la capa inferior, con resistividades bajas y muy bajas, marca entre 5.2 y 6.6 ohm-m, lo cual expresa que el acuífero se encuentra altamente mineralizado en el litoral; el contenido arcilloso también es el responsable de las bajas resistividades de esta capa; los espesores de la capa inferior disminuyen desde 269 m en el litoral hasta desaparecer con dirección continental. El tercer horizonte, presente en la parte inicial y final de la sección, con resistividades de 2.4 a 9.5 ohm-m, es indicativo de un alto contenido arcilloso que lo hace impermeable. El cuarto horizonte está constituido por el basamento rocoso impermeable.

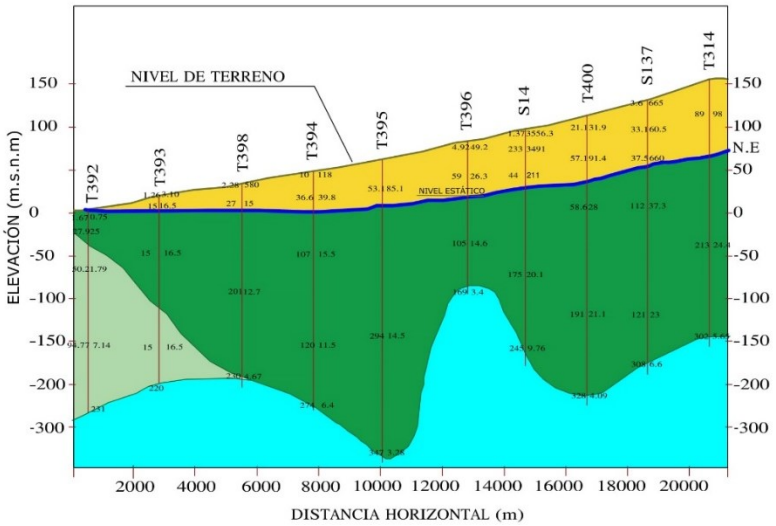


Figura 12. Perfil geoeléctrico H-H´.

Por otro lado, se tiene una sección G-G´ de 19.25 km, que comprende los sectores Las Palmeras, San Antonio, El Progreso y Asentamiento 03. Presenta tres horizontes geoeléctricos (Figura 5a y Figura 13). El primero está conformado por dos a más capas y se encuentra en estado seco; sus espesores varían de 0 m en el litoral hasta 89 m, con resistividades que llegan a 660 ohm-m e inclusive 3 500 ohm-m. El segundo horizonte representa al acuífero saturado, actualmente en explotación, y está constituido por varias capas con espesores que llegan hasta 294 m; presenta resistividades que mayormente varían de

2019, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

11.5 a 37.3 ohm-m; una característica especial de este horizonte son las bajas resistividades (cerca de la línea de litoral), que fluctúan entre 0.75 y 7.14 ohm-m, lo que indica aguas mineralizadas, producto de la intrusión marina (sector Las Palmeras). El tercer horizonte que subyace al acuífero saturado presenta resistividades muy bajas, que varían de 3.28 a 8.1 ohm-m; representa al basamento impermeable arcilloso; esta sección permite confirmar la no existencia de un horizonte permeable que subyace al acuífero saturado; en consecuencia, se descarta la posibilidad de ubicar un acuífero profundo.

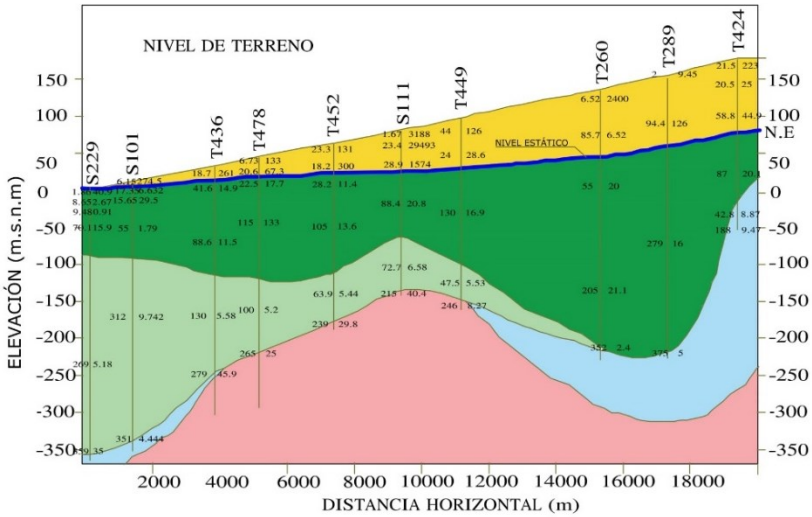


Figura 13. Perfil geoeléctrico G-G´.

La salinización de los acuíferos costeros es consecuencia de una gestión deficiente o incontrolada, que genera una sobreexplotación que puede ser prevenida (Cabrera & Custodio, 2004). Una medida de mitigación son las barreras hidráulicas negativas, que bombean cerca de la orilla, interceptando el agua salada; en acuíferos bajo procesos de intrusión marina han sido propuestas como medida correctiva para la intrusión de agua de mar, en casos en los que se deben mantenerse las cargas hidráulicas bajas (Pool & Carrera, 2010). La principal desventaja de estas barreras es que bombean una proporción significativa de agua dulce, que se mezcla con agua salada en el pozo.

Habiéndose identificado que el acuífero de La Yarada se encuentra en proceso por intrusión marina, Pino (2014) propone plantear un proyecto piloto de barrera hidráulica negativa doble, con 10 pozos en doble fila,

2019, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

alineados en la dirección normal a la dirección predominante del flujo. Al tratarse de una medida de remediación del proceso intrusivo de agua de mar, se considera de aplicabilidad inmediata, lo cual podrá traer consigo resultados rápidos, que permitirán estudiar a mayor detalle su funcionamiento, con lo que se podrán tomar decisiones sobre su incorporación a mayor escala. Se consideró que la zona de ubicación de la barrera piloto debe ser la margen derecha aguas abajo del acuífero, es decir, la zona contigua al denominado Cerro Moreno, asumiendo que dicho cerro funcionaría como una barrera impermeable y evitaría flujos no deseados en el contorno de la batería.

Conclusiones

El acuífero de La Yarada actualmente se encuentra sobreexplotado (volumen de explotación no controlado por pozos no autorizados) con relación a su reserva renovable (PET, 2013). La explotación supera a la recarga; esto se manifiesta por el constante descenso del nivel del acuífero freático y el progresivo avance de la intrusión marina, que actualmente alcanza 60 km^2; la degradación de la calidad del agua en un área de 127 km^2 comprende los sectores Los Palos, El Chasqui y Los Olivos, incluyendo La Esperanza, Las Palmeras y Rancho Grande.

La reserva renovable es del orden de 54 Hm^3/año; la explotación es de 111 Hm^3/año, por tanto la sobreexplotación llega a los 57 Hm^3/año. Por tal situación y ante la escasa recarga del acuífero, se viene extrayendo el agua proveniente de la reserva permanente o no renovable. Si no se toman las medidas del caso en forma oportuna, la situación puede alcanzar niveles de mayor riesgo y el deterioro de la calidad del agua puede acrecentarse debido al progresivo avance de la intrusión marina.

Existe coincidencia entre la dirección del flujo subterráneo y el aumento en el contenido de cloruros, aunque localmente se aprecian algunas desviaciones. La distribución de las isolíneas puede considerarse homogénea desde 200 hasta 250 mg/l; a partir de 300 mg/l se empieza a generar la existencia de dos grandes núcleos (sectores La Esperanza-

2019, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Las Palmeras y Los Palos), con contenido anormalmente alto de cloruros, así como el aumento generalizado en la concentración de dicho parámetro a medida que hay proximidad hacia la costa. El brusco aumento que se produce en la Terraza Baja no es producto del incremento de los cloruros en la dirección del flujo sino de la contaminación con agua de mar. Este incremento en las concentraciones de cloruros es atribuible a varios procesos que pueden ser coincidentes o no espacialmente.

Según las secciones geoeléctricas, se tiene una capa inferior con resistividades bajas y muy bajas, entre 5.2 y 6.6 Ohm-m, lo cual expresa que el acuífero se encuentra altamente mineralizado en el litoral, es decir, zona cercana al océano Pacífico, situación que denota procesos de intrusión marina.

A futuro se deben buscar las medidas a corto, mediano y largo plazos que comprendan la reducción progresiva de la explotación de las aguas subterráneas o la incorporación artificial de agua al sistema en diferentes etapas, permitiendo de forma secuencial disminuir la velocidad del descenso del nivel freático, estabilizarlo y, finalmente, lograr su recuperación.

Agradecimientos

Un agradecimiento muy especial a los profesionales y funcionarios de la Autoridad Nacional del Agua, Lima, Perú, por brindar la información de base requerida en el presente trabajo.

Referencias

Acosta , H., Benavente, C., Cotrina, G., Peña, F., & Alván, A. (2008). *Estudio geológico del valle del río Caplina Tacna-Perú, base para el estudio hidrogeológico de compatibilizacion del reservorio acuífero de la Yarada, Tacna, Perú, Convenio PET-INGEMMET* (INGEMMET, 82). Lima. Perú.

Acosta, H., Mamani, M., Alván, A., & Rodrígues, J. (2012). Geología de los cuadrángulos de la Yarada, Tacna y Huaylillas Hoja 37-u, 37-v y 37-x. *Carta Geológica Nacional*. Boletín 145, Serie A, 87. Recuperado de http://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/ingemmet/107

2019, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

ANA, Autoridad Nacional del Agua. (2009). *Caracterización hidrogeológica del acuífero del valle del Caplina-La Yarada*. Lima, Perú: Autoridad Nacional del Agua, Dirección de Gestión de Calidad de los Recursos Hídricos.

ANA, Autoridad Nacional del Agua. (2010). *Caracterización hidrogeoquímica del acuífero Caplina.* Lima, Perú: Autoridad Nacional del Agua, Dirección de Gestión de Calidad de los Recursos Hídricos.

ANA, Autoridad Nacional del Agua. (2011). *Informe técnico 03. Calidad de agua cuenca Caplina Tacna.* Lima, Perú: Autoridad Nacional del Agua, Dirección de Gestión de Calidad de los Recursos Hídricos.

Cabrera, M., & Custodio, E. (2004). Groundwater flow in a volcanic–sedimentary coastal aquifer: Telde area, Gran Canaria, Canary Islands, Spain. *Hydrogeology Journal*, 12(3), 305-320. DOI: 10.1007/s10040-003-0316-y

El Alfy, M., Aref, L., Fathy, A., & Abdulaziz, A.-B. (2017). Assessing the hydrogeochemical processes affecting groundwater pollution in arid areas using an integration of geochemical equilibrium and multivariate statistical techniques. *Environmental Pollution*, 229(2017), 760-770. DOI: 10.1016/j.envpol.2017.05.052

Eyankware, M., Obasi, P., & Akakuru, O. (2016). Use of hydrochemical approach in evaluation of water quality around the vicinity of Mkpuma Ekwaoku Mining District, Ebonyi State, SE. Nigeria for Irrigation Purpose. *Indian Journal of Science*, 23(88), 881-895.

Flores, A., & Sempere, T. (setiembre, 2002). Avances sobre la historia geológica del valle de Tacna. *Congreso Peruano de Geología. Trabajos Científicos-Sociedad Geológica del Perú*. Lima, Perú.

Flores, A., Sempere, T., & Fornari, M. (octubre, 2004). Síntesis actualizada de la estratigrafía del Cenozoico en el extremo sur del Perú. *Congreso Peruano de Geología*. *Resúmenes extendidos-Sociedad Geológica del Perú* (pp. 444-447). Lima, Perú.

Jaén, H., Ortiz, G., & Wilson, J. J. (1963). Geología de los cuadrángulos de la Yarada, Tacna y Huaylillas. *Comisión Carta Geológica Nacional.* Boletín 6, 70. Recuperado de http://repositorio.ingemmet.gob.pe/bitstream/ingemmet/561/1/A006-Boletin_Huaylillas-37x.pdf

2019, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Jenks, W. F. (1948). Geología de la hoja de Arequipa al 200,000 Geology of the Arequipa Quadrangle of the Carta Nacional del Perú. *Instituto Geológico del Perú.* Boletín 9, 204. Recuperado de http://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/ingemmet/2198.

Martines, C., Vargas, R., Montoya, J., Chamorro, C., & Zenteno, E. (1996). Estudio hidrogeológico de las pampas de la Yarada y Hospicio, Tacna. Lima, Perú: Ministerio de Agricultura, Instituto Nacional de Recursos Naturales.

OMS, Organización Mundial de la Salud. (2006). *Guías para la calidad del agua potable.* Recuperado de https://es.scribd.com/document/263887495/Guias-Para-La-Calidad-Del-Agua-Potable-OMS

PET, Proyecto Especial Tacna. (2013). *Diagnóstico situacional del acuífero Caplina en el ámbito del sector La Yarada.* Tacna, Perú: Proyecto Especial Tacna.

Pino, E. (2014). *Diagnóstico para la ubicación preliminar de una barrera hidráulica piloto en el acuífero de La Yarada con fines de contener la intrusión marina.* Lima, Perú: Autoridad Nacional del Agua.

Pino, E., Tacora, P., Steenken, A., Valle, A., Chávarri, E., Ascencios, D., & Mejía, J. (2017). Efecto de las características ambientales y geológicas sobre la calidad del agua en la cuenca del río Caplina, Tacna, Perú. *Tecnología y ciencias del agua*, 8(6), 77-99. DOI: 10.24850/j-tyca-2017-06-06

Pino, E., Chávarri, E., & Ramos, L. (2018). Crisis de gobernanza y gobernabilidad y sus implicancias en el uso inadecuado del agua subterránea, caso acuífero costero de La Yarada, Tacna, Perú. *Idesia* (Arica), 36(3), 77-85. DOI: https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292018005001301

Pool, M., & Carrera, J. (2010). Dynamics of negative hydraulic barriers to prevent seawater intrusion. *Hydrogeology Journal*, 18(1), 95-105. DOI: 10.1007/s10040-009-0516-1

Sunass, Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento de Perú. (1995). *Reglamento de calidad de agua para consumo humano, Perú.* Lima, Perú: Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento de Perú.

2019, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Todd, F. (2015). New NASA data show how the world is running out of water. *The Washington Post*. Recuperado de https://www.independent.co.uk/environment/nasa-data-shows-the-world-is-running-out-of-water-10325188.html

Valhondo, C., Martínez-Land, L., Carrera, J., Hidalgo, J. J., Tubau, I., De Pourcq, K., Grau-Martínez, A, & Ayora, C. (2016). Tracer test modeling for characterizing heterogeneity and local-scale residence time distribution in an artificial recharge site. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20, 4209-4221. DOI: 10.5194/hess-20-4209-2016

Vergara, W., Ríos, A., Trapido, P., & Malarín, H. (2014). *Agricultura y clima futuro en América Latina y el Caribe: Informe del Banco Interamericano de Desarrollo.* Washington, DC, USA: Banco Interamericano de Desarrollo. Recuperado de file:///C:/Users/HP%20ELITEBOOK%20X360/Downloads/Agricultura-y-clima-futuro-en-Am%C3%A9rica-Latina-y-el-Caribe-impactos-sist%C3%A9micos-y-posibles-respuestas.pdf